

УДК 532.517

РАЗРАБОТКА ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ ДВИЖЕНИЯ ВИБРОХОДА В ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ

А.Н. Нуриев, О.С. Захарова

Аннотация

Рассматривается прямолинейное движение двухмассовой системы в вязкой несжимаемой жидкости. Перемещение системы как целого происходит за счет продольного периодического движения одного тела относительно другого. Исследуемая механическая система моделирует виброход - мобильное устройство, способное перемещаться в сопротивляющейся среде без подвижных внешних частей. В работе проводится разработка численной модели виброхода в пакете OpenFOAM, исследуется случай движения виброробота клиновидной формы в вязкой жидкости при гармонических осцилляциях внутренней массы. **Ключевые слова:** вязкая жидкость, прямое численное моделирование, виброход, эффективность движения, OpenFOAM.

Введение

Изучением вибрационных мобильных устройств (вибророботов) в течение последних двух десятилетий занимаются отечественные и зарубежные ученые Ф.Л.Черноусько, Н.Н.Болотник, Т.Ю.Фигурина, И.М.Зейдис, С. Ф. Яцун, K.Zimmermann, E. Papadopoulos, A. Fidlin, K. Furuta, H. Li, J. J. Thomsen и многие другие [1–5]. Технически такие механизмы реализуются в России (ИПМех РАН, Курский государственный технический университет), Германии в Техническом университете г. Ильменау, в Японии и других странах.

Основная часть проведенных исследований посвящена прямолинейному движению вибрационных механизмов по шероховатой плоскости при наличии кулоновского трения. Но в последнее время проблема управления движением вибророботов широко обсуждается в литературе применительно к другим законам сопротивления и, в частности, гидродинамическому сопротивлению. В этой связи особо можно выделить следующие работы [4, 5]. В [4] решалась задача оптимизации движения робота при наличии произвольной степенной зависимости сил сопротивления от скорости, в том числе квадратичной, которая часто используется как приближение сил сопротивления, возникающих при движении тела в ньютоновской жидкости. В работе [5] оптимизировалось движение виброробота в вязкой жидкости, закон сопротивления был сконструирован на основе экспериментальных данных по обтеканию сферы вязкой жидкостью. Однако, все эти исследования проводились в рамках аналитических моделей, опирающихся на условия квазистационарности, когда сила сопротивления однозначно определяется скоростью движения корпуса. В действительности гидродинамические силы сопротивления движению корпуса в вязкой жидкости определяются течениями, которые были сформированы телом в жидкости за все время движения. В общем случае они не могут быть описаны исключительно в терминах мгновенной скорости и должны определяться всей предысторией движения. Изучение этой сложной динамической системы очевидно возможно только с помощью численных методов.

В данной работе проводится прямое численное моделирование движения виброробота клиновидной формы в вязкой жидкости при простейших гармонических осцилляциях внутренней массы. Задача рассматривается в плоской постановке. Гармонический закон движения очевидно не является оптимальным с точки зрения эффективности движения, однако несимметричная форма корпуса должна обеспечивать различную реакцию внешней среды на разных фазах движения корпуса (в прямом и обратном направлении) робота, обеспечивая его направленное движение в жидкости. Целью работы является исследования взаимодействия виброробота с вязкой средой, анализ эффективности движения виброробота клиновидной формы при гармонических осцилляциях внутренней массы.

Моделирования движения проводится на базе пакета OpenFOAM. В расчетах задействованы как оригинальные, так и модифицированные модули пакета. Вычисления проводятся на высокопроизводительных кластерах КазФ МСЦ РАН и проекта unihub.

1. Постановка задачи

Рассмотрим систему, состоящую из двух твердых тел. Основное тело (тело M – корпус) массы M находится в вязкой несжимаемой жидкости, а тело массы m (далее – «внутренняя масса») перемещается внутри него. Изучаются продольные периодические движения внутренней массы относительно тела M , при которых вся система перемещается как целое. Обозначим через u_M скорость корпуса, а через s и $\nu = \dot{s}$ – перемещение и скорость внутренней массы относительно корпуса. Уравнения движения внутренней массы и корпуса в неподвижной системе координат имеют вид

$$m(\dot{u}_M + \dot{\nu}) = -G, \quad M\dot{u}_M = G + F, \quad (1)$$

Здесь F – силы действующие на тело со стороны жидкости, G – сила взаимодействия внутренней массы и тела. Исключая из уравнения (1) силу G , нормируя скорость u на U_0 – амплитуду скорости колебания внутренней массы, время t на RU_0^{-1} , где R – характерный размер тела, получим основное уравнение движения двухмассовой системы в следующем виде:

$$\dot{u}_M = -\mu_2 \dot{\nu} + \mu_1 \frac{R^2}{S} F \quad (2)$$

Здесь μ_2 – отношение подвижной массы к полной массе виброробота ($\mu_2 = m/(M + m)$), μ_1 – отношение массы вязкой жидкости, занимающей тот-же объем, что и виброробот, к массе виброробота ($\mu_1 = M_f/(M + m)$), S – площадь поперечного сечения корпуса (рис. 1).

Движение жидкости вокруг виброробота описывается системой уравнений Навье-Стокса. Нормируя пространственные координаты, время и скорость на R , RU_0^{-1} , U_0 соответственно, запишем управляющую систему уравнений в декартовой системе координат как

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \cdot \nabla U = -\nabla p + \frac{1}{\text{Re}} \Delta U, \quad \nabla \cdot U = 0. \quad (3)$$

где $U = (u, v)$ – безразмерная скорость, p – безразмерное давление, $\text{Re} = U_0 R / \nu$ – число Рейнольдса.

Далее мы будем рассматривать движение виброробота клиновидной формы (цилиндра с треугольным равносторонним сечением) в жидкости при гармонических осцилляциях внутренней массы:

$$\dot{\nu} = A \sin(2\pi f t),$$

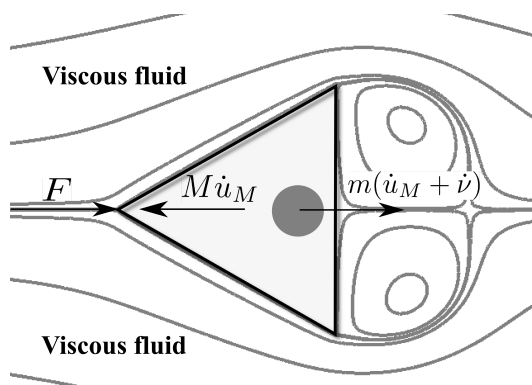


Рис. 1. Схема движения

где A и f — безразмерная амплитуда скорости и частота колебаний соответственно.

2. Численная реализация

Численное решение задачи проводится в пакете OpenFOAM [6–8]. В качестве расчетной области рассматривается прямоугольный параллелепипед размерами $50 \times 30 \times 1$, в центре которого помещен равносторонний цилиндр треугольного сечения. Выбор трехмерной области для моделирования плоского течения проводится в соответствии с особенностью программного обеспечения. В используемой декартовой системе координат ребра параллелепипеда параллельны основным осям, и плоскость течения параллельна плоскости xOy .

Для дискретизации расчетной области используются структурированные блочные сетки, построенные с помощью утилиты blockMesh, входящей в состав OpenFOAM. Область разбивается на непересекающиеся ячейки имеющие форму шестигранников. Разбиение в направлении оси Oz состоит из одной ячейки, так как в силу двумерности задачи течение в этом направлении отсутствует.

Дискретизация системы уравнений движения жидкости в пакете OpenFOAM проводится по методу конечных объемов (FVM) в декартовой системе координат. Дискретные значения составляющих скорости и дискретные давления локализуются в центрах ячеек расчетных сеток. Для вычисления объемных интегралов по контрольному объему используется общая процедура Гаусса. Для аппроксимации градиента давления в расчетах применяется линейная интерполяция. Для интерполяции переменных в конвективных слагаемых используется нелинейная NVD (normalised variable diagram) схема «Gamma», предложенная в работах. В диффузионных слагаемых при дискретизации оператора Лапласа нормальные градиенты скорости на поверхности ячейки аппроксимируются с помощью симметричной схемы второго порядка с поправкой на неортогональность.

Для дискретизации системы уравнений по времени используется неявная схема Эйлера. Шаг по времени во всех расчетах выбирается из условия — максимальное число Куранта не превышает значения 0.1.

Решение дискретизированной задачи проводится на основе метода PISO, реализованного в модуле icoFoam.

3. Результаты численного эксперимента

Расчеты в работе выполнялись в диапазоне чисел Рейнольдса $50 < Re < 250$ для следующей комбинации управляющих параметров $\mu_1 = 0.06$, $\mu_2 = 0.61$,

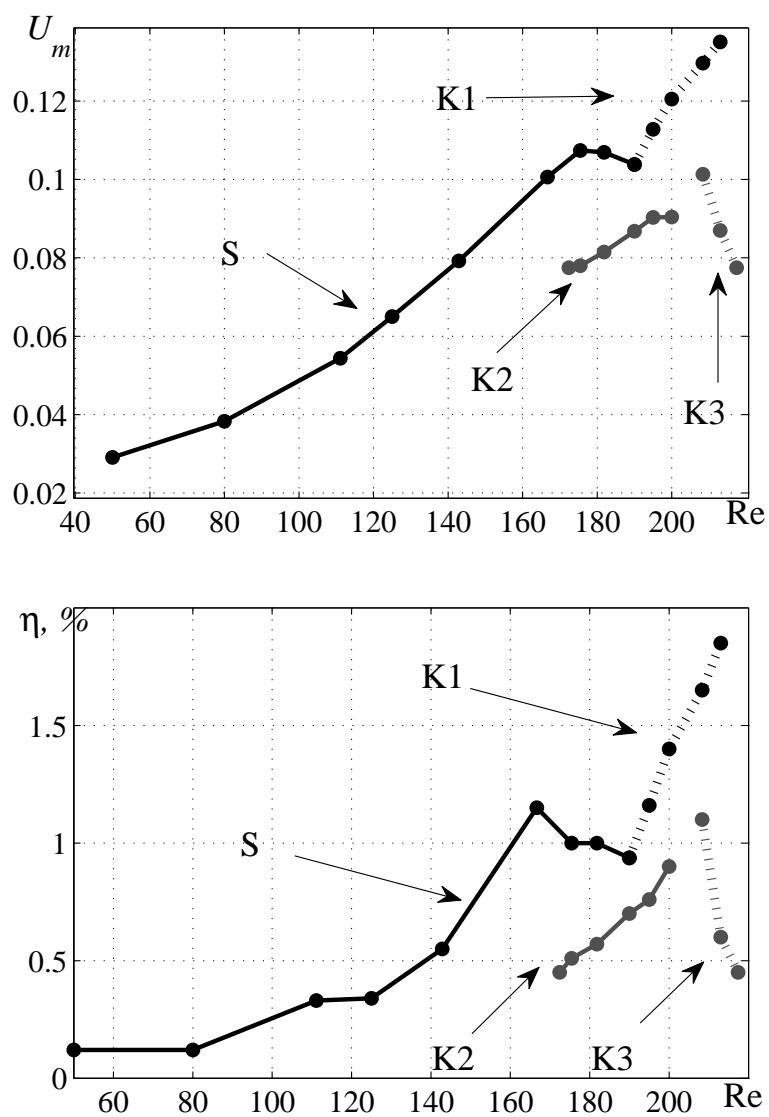


Рис. 2. Характеристики движения виброробота: верхний рисунок – зависимость средней скорости от числа Рейнольдса, нижний рисунок – зависимость эффективности от числа Рейнольдса. Режимы S, K1, K2, K3.

$f = 1/5$, $A = 2\pi/5H$, где H – высота треугольника. Вычисления проводились с разных начальных приближений, определяемых различной начальной скоростью набегающего потока. Для определения устойчивости режимов в течение вносились возмущения по методу Мартинеса [9].

В исследуемом диапазоне было обнаружено 4 устойчивых направленных режима движения виброробота. Для описания этих режимов удобно ввести следующие характеристики движения: среднюю скорость движения U_a и показатель эффективности движения η , который отражает энергетические затраты на движение тела с помощью внутреннего движителя. Обозначая угловыми скобками среднее по периоду, определим их следующим образом:

$$U_a = \langle U \rangle, \quad \eta = \frac{N_0}{N_{vbr}}$$

Здесь $N_0 = N(\langle U \rangle)$ – минимальная мощность, необходимая для движения тела со скоростью U_a , $N_{vbr} = N(U)$ – мощность, затрачиваемая при движении виброробота с этой скоростью.

Изменения характеристик движения виброробота с ростом числа Рейнольдса при разных режимах движения представлены на рис. 2.

В зоне малых чисел Рейнольдса ($Re < 170$) наблюдается единственный периодический симметричный относительно оси колебания режим S, который определяет направленное движение робота вперед вершиной. Рост нелинейности закона сопротивления среды в этом диапазоне с увеличением числа Рейнольдса приводит к росту значений как средней скорости, так и показателя эффективности движения виброробота. При $Re > 170$ одновременно с базовым режимом S появляется квазипериодический режим K2, реализующий противоположно-направленное движение вперед основанием. Таким образом возникает гистерезис режимов движения. Характеристики движения робота в режиме K2 ниже, чем в режиме S.

В окрестности $Re = 190$ базовый режим S переходит в квазипериодический несимметричный режим K1. Переход сопряжен с кризисом по основным показателям движения, который особенно хорошо заметен на графике изменения коэффициента эффективности (Рис 2). Рост характеристик движения возобновляется, когда режим K1 полностью устанавливается. В этом режиме достигается максимальная эффективность движения $\eta = 1.85\%$ при $Re = 215$. При больших числах Рейнольдса режим K1 становится неустойчивым. Одновременно с режимом K1, в окрестности $Re = 210$ появляется другой квазипериодический режим K3. При $Re > 215$ K3 становится единственным устойчивым режимом. В режиме K3 наблюдается стремительное падение характеристик движения с увеличением числа Рейнольдса. Локализовать другие периодические или квазипериодические режимы течения при больших числах Рейнольдса рамках данного исследования не удалось.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 14-01-31230 мол_а)

Summary

A.N. Nuriev, O.S. Zakharova. Development of a numerical model of a vibration-driven robot motion in a viscous fluid.

A rectilinear motion of a two-mass system in a viscous incompressible fluid is considered. The motion of the system as a whole is forced by periodic oscillations of the one body relative to another. This mechanical system simulates a vibration-driven robot, i.e. a mobile device

capable to move in a resistive medium without external moving parts. The computational model is constructed on the base of the OpenFOAM CFD software package. The case of the wedge-shaped vibration-driven robot motion in a viscous fluid forced by harmonic oscillations of the internal mass is studied.

Key words: viscous fluid, direct numerical simulation (DNS), vibration-driven robot, efficiency of motion, OpenFOAM.

Литература

1. *Chernous'ko F. L.* The optimal periodic motions of a two-mass system in a resistant medium // J. Appl. Math. Mech. -2008 – V. 72 – P. 116–125.
2. *Bolotnik N. N., Figurina T. Y., Chernous'ko F. L.* Optimal control of the rectilinear motion of a two-body system in a resistive medium// J. Appl. Math. Mech. - 2012 – V. 76 – P. 1–14.
3. *Chernous'ko F. L.* Analysis and optimization of the motion of a body controlled by means of a movable internal mass// J. Appl. Math. Mech. - 2006 – V. 70 – P. 19–842.
4. *Yegorov A. G., Zakharova O.S.* The energy-optimal motion of a vibration- driven robot in a resistive medium// J. Appl. Math. Mech. - 2010 – V. 74 – P. 443–451.
5. *Yegorov A. G., Zakharova O. S.* The optimal quasi-stationary motion of a vibration-driven robot in a viscous medium// Russian Mathematics - 2012 – V. 56 – P. 50–55.
6. OpenFOAM (the open source cfd toolbox): User guide version 2.2.1
URL: <http://www.openfoam.org/docs/user/>
7. *Нуриев А.Н., Зайцева О.Н.* Решение задачи об осциллирующем движении цилиндра в вязкой жидкости в пакете OpenFOAM.// Вестн. Каз. технологического ун-та. - 2013.– Т. 8 – С. 116–123.
8. *Egorov A. G., Kamalutdinov A. M., Nuriev A. N., Paimushin V. N.* Theoretical-experimental method for determining the parameters of damping based on the study of damped flexural vibrations of test specimens. 2. Aerodynamic component of damping// Mechanics of Composite Materials - 2014 – V. 50 – P. 267–278.
9. *Martinez G.* Caractéristiques dynamiques et thermiques de l'écoulement au- tour d'un cylindre circulaire a nombres de reynolds moderes// Ph.D. thesis, I.N.P. Toulouse - 1979.

Нуриев Артем Наилевич – кандидат физико-математических наук, ассистент кафедры аэрогидромеханики Казанского (Приволжского) федерального университета
E-mail: artem501@list.ru

Захарова Ольга Сергеевна – аспирант кафедры аэрогидромеханики Казанского (Приволжского) федерального университета
E-mail: zakharovaos.mex@gmail.com